

УДК 621.391

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ СОГЛАСОВАННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

[С.В. ГАРКУША](#)

Полтавский университет
экономики и торговли

Abstract – A flow model for traffic management in the telecommunications network (TCN) is proposed. This model ensures consistent solution of the following network problems: multipath routing; traffic policing; dynamic allocation of links bandwidth between threads of users. Within the obtained solutions the required values of the key indicators of quality of service such as packet rate, average delay and packet loss probability are provided. Similar nature of solutions was possible to implement using an updated version of the conservation of flow conditions on the routers in the network and TCN as a whole, thereby expanding the range of solvable tasks on the traffic profiling processes. This ultimately led to modification of the conditions for ensuring the quality of service that were obtained using the apparatus of the network tensor analyzing. The results obtained are adapted to service of SMTP / TCP, IP, FTP, TCP, HTTP flows. The efficiency of the proposed approach is demonstrated by a numerical example. In general, the use of solutions proposed in the article makes it possible to reduce failures in service on the average from 60 to 80% and to reduce the allowable value of multipath delay of packets without loss of intensity of the input stream to 15-35%. In terms of practical implementation of the developed model it is worth noting that the highest efficiency of its implementation is provided in the multiframe traffic conditions of different service classes with differentiated QoS-requirements for a variety of parameters: packet rate, average delay and packet loss probability.

Анотація – Запропоновано поточкову модель управління трафіком в телекомунікаційній мережі, в рамках якої забезпечується узгоджене розв'язання наступних мережних задач: багатошляхова маршрутизація; профілювання трафіка; динамічний розподіл пропускної здатності каналів зв'язку між потоками користувачів. В рамках отриманих рішень забезпечуються необхідні значення таких ключових показників якості обслуговування як швидкість передачі пакетів, середня затримка та ймовірність втрат пакетів.

Аннотация – Предложена потоковая модель управления трафиком в телекоммуникационной сети, в рамках которой обеспечивается согласованное решение следующих сетевых задач: многопутевая маршрутизация; профилирование трафика; динамическое распределение пропускной способности каналов связи между потоками пользователей. В рамках полученных решений обеспечиваются требуемые значения таких ключевых показателей качества обслуживания как скорость передачи пакетов, средняя задержка и вероятность потерь пакетов.

Введение

В современных мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) уровень качества обслуживания (Quality of Service, QoS) во многом зависит от эффективности решения ключевых задач по управлению трафиком, среди которых задачи маршрутизации, профилирования трафика и приоритетной обработки пакетов на узлах сети, т.е. распределения пропускной способности каналов связи ТКС. Именно в ходе

решения этих задач важно обеспечить дифференциацию качества обслуживания одновременно по таким показателям как производительность (скорость передачи) средняя задержка, джиттер и вероятность потерь пакетов. К сожалению, в рамках существующих технологических решений связанные между собой по цели функционирования задачи управления трафиком решаются в основном порознь, с использованием различных протокольных средств [1]. Поэтому важный источник улучшения качества обслуживания видится в повышении уровня согласованности перечисленных управляющих задач на основе более эффективного использования сетевых ресурсов ТКС.

Согласованное решение комплекса задач по управлению трафиком предполагает некоторое усложнение используемых математических моделей и методов, связанное с потерей линейности, ростом размерности и т.д. Усложнение математических моделей, описывающих процесс управления трафиком, иногда затрудняет и получение в аналитическом виде условий обеспечения качества обслуживания по множеству показателей, что потребовало применения нетривиальных подходов и основанных на них теоретических решений. Для решения подобного рода задач хорошо себя зарекомендовал подход, основанный на тензорном моделировании ТКС с использованием постулатов, предложенных Г. Кроном [2]. Эволюция тензорных решений задач управления трафиком с поддержкой QoS представлена в табл. 1.

Таблица 1. Эволюция тензорных решений задач управления трафиком с поддержкой качества обслуживания по множеству показателей

Тип задач управления трафиком	Перечень поддерживаемых QoS-показателей	Ссылки на литературные источники
Многопутевая маршрутизация	Скорость передачи, средняя задержка	[3-5]
Многопутевая маршрутизация, распределение пропускной способности каналов связи	Скорость передачи, средняя задержка	[6]
Многопутевая маршрутизация, профилирование трафика	Скорость передачи, средняя задержка	[7]
Многопутевая маршрутизация, предотвращение перегрузки очереди	Скорость передачи, средняя задержка, вероятность потерь пакетов	[8, 9]

В этой связи с целью дальнейшего расширения функционала возможностей тензорного подхода в данной статье будет предложена модель ТКС, ориентированная на обеспечение качества обслуживания по множеству QoS-показателей (скорость

передачи, средняя задержка, вероятность потерь пакетов) в условиях согласованного решения следующих задач управления трафиком в телекоммуникационной сети:

- многопутевая маршрутизация;
- предотвращение перегрузки очереди;
- распределение пропускной способности каналов связи;
- профилирование трафика.

I. Потокковая модель управления трафиком с учетом потерь пакетов и отказов в обслуживании в телекоммуникационной сети

Пусть структура ТКС описывается с помощью одномерного симплициального комплекса $S = (U, V)$, где $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ – множество нульмерных симплексов – узлов (маршрутизаторов) сети, а $V = \{v_z = (i, j); z = \overline{1, n}; i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$ – множество одномерных симплексов – ветвей сети, где ветвь $v_z = (i, j)$ моделирует z -й канал связи (КС), который соединяет i -й и j -й маршрутизаторы ТКС. Для удобства характеристики и параметры, относящиеся к КС, будут обозначаться как одинарным, так и двойным индексом [8, 9]. Например, для каждого КС, моделируемого ветвью $v_z = (i, j) \in V$, пропускная способность (1/с) будет обозначаться как через φ_z , так и через $\varphi_{(i,j)}$. Важно учесть, что каждый маршрутизатор сети по определению имеет несколько интерфейсов, через которые он может передавать пакеты инцидентным ему узлам-соседям. Тогда номера интерфейсов для каждого отдельно взятого узла будут соответствовать номерам подключаемых через них соседних узлов.

Пусть ТКС обслуживает потоки $k \in K$ нескольких классов обслуживания $h \in H$. В соответствии с рекомендацией ITU-T Y.1541 таких классов 8 в IP-сетях, а в АТМ-сетях – 5 (рек. ITU-T I.356). Тогда результатом решения задачи маршрутизации является расчет множества маршрутных переменных $x_{(i,j)}^{h_k}$, каждая из которых характеризует долю интенсивности k -го потока h -го класса обслуживания, направленного с i -го на j -й узел через соответствующий, т.е. j -й интерфейс. В процессе информационного обмена на интерфейсах маршрутизаторов могут возникать потери пакетов ввиду перегрузки формируемых на них очередей. Обозначим через $p_{(i,j)}^{h_k}$ – вероятность потерь пакетов k -го потока h -го класса обслуживания на j -м интерфейсе i -го узла по причине его перегрузки. Тогда выражение $x_{(i,j)}^{h_k}(1 - p_{(i,j)}^{h_k})$ (рис. 1) характеризует долю интенсивности k -го потока h -го класса, протекающего в канале $(i, j) \in V$, а произведение $x_{(i,j)}^{h_k}p_{(i,j)}^{h_k}$ численно определяет долю интенсивности k -го потока h -го класса, получившего отказ в обслуживании на j -м интерфейсе i -го узла.

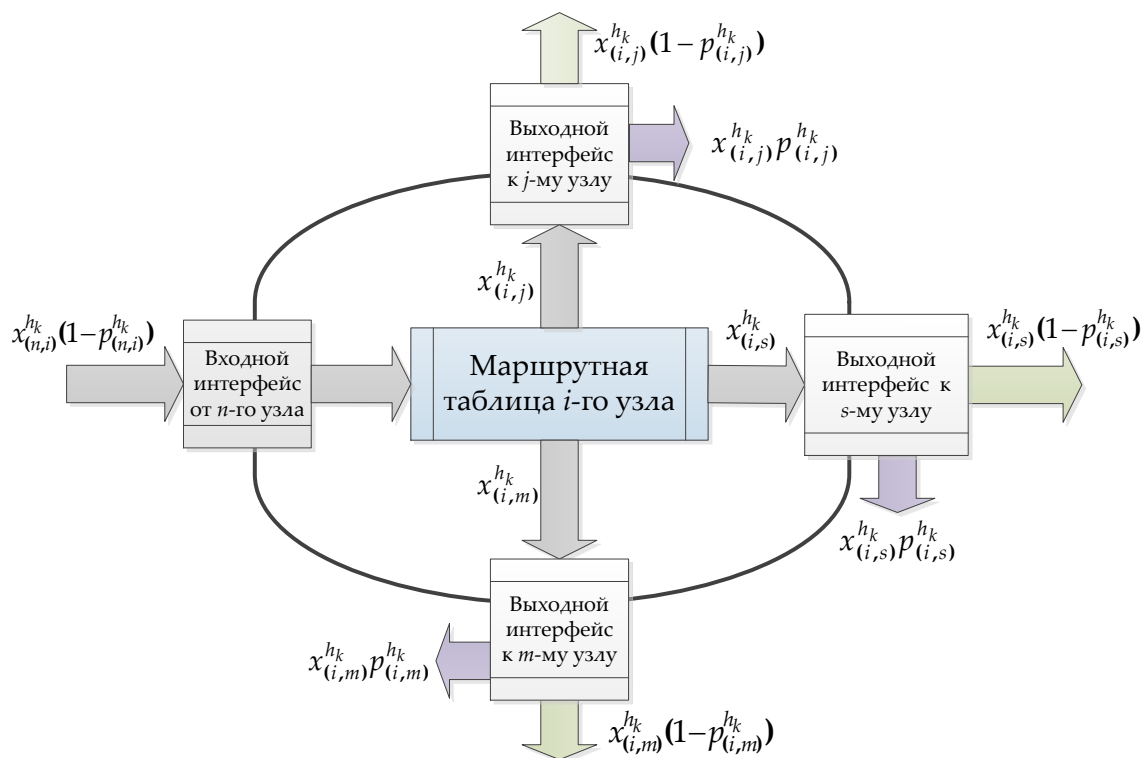


Рис. 1. Упрощенная архитектура i -го узла сети при маршрутизации k -го потока h -го класса обслуживания

С целью учета возможных потерь пакетов на маршрутизаторах ТКС условие сохранения потока в рамках предлагаемой модели маршрутизации принимает вид:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{(i,j)}^{h_k} = 1 - \omega^{h_k} \text{ при } k \in K, i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{(i,j)}^{h_k} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{(j,i)}^{h_k}(1 - p_{(j,i)}^{h_k}) = 0 \text{ при } k \in K, i \neq s_{h_k}, d_{h_k}; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} x_{(j,i)}^{h_k}(1 - p_{(j,i)}^{h_k}) = \varepsilon^{h_k} \text{ при } k \in K, i = d_{h_k}, \end{cases} \quad (1)$$

где K – множество потоков в сети; H – множество классов обслуживания; s_{h_k} – узел-отправитель; d_{h_k} – узел-получатель для пакетов k -го потока h -го класса обслуживания; ω^{h_k} – доля k -го потока h -го класса, получившего отказ в обслуживании сетью на приграничном узле, узле-отправителе; ε^{h_k} – доля k -го потока h -го класса, обслуженного сетью, т.е. пакеты которого успешно доставлены до узла-получателя.

Доля отказов в обслуживании пакетов k -го потока h -го класса подчиняется одному из двух условий:

$$0 \leq \omega^{h_k} \leq 1 \quad (2)$$

или

$$\omega^{h_k} \in \{0;1\}.$$

Первое неравенство (2) имеет место в случае так называемого «эластичного» трафика, когда допускается частичное ограничение интенсивности потока на входе в сеть, второе условие справедливо в противном случае.

В ходе расчетов интерфейс, функционирующий в соответствии со схемой Tail Drop, можно представить в виде системы массового обслуживания (СМО) с отказами, например, $M/M/1/N$, в рамках которой вероятность потерь пакетов может быть рассчитана как

$$p = p(q < \Theta_{\text{буф}}) = \frac{(1-\rho)(\rho)^N}{1-(\rho)^{N+1}}, \quad (3)$$

где $\rho = \frac{\lambda}{\varphi}$ – коэффициент загрузки канала; q – текущая средняя длина очереди; $N = \Theta_{\text{буф}} + 1$ – максимальное количество пакетов, которое может находиться на интерфейсе, включая буфер ($\Theta_{\text{буф}}$) и сам канал; λ – пакетная интенсивность суммарного потока в рассматриваемом канале (1/с).

Для наглядности индексы, характеризующие принадлежность интерфейса тому или иному узлу (маршрутизатору), а также номер потока в выражении (3) опущены. С учетом возможных потерь пакетов интенсивность потока в канале $(i,j) \in V$ в рамках введенных выше обозначений рассчитывается как

$$\lambda_{(i,j)} = \sum_{h \in H} \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle \text{mpб} \rangle} x_{(i,j)}^{h_k} (1 - p_{(i,j)}^{h_k}), \quad (4)$$

где $\lambda_{h_k}^{\langle \text{mpб} \rangle}$ – средняя интенсивность k -го потока h -го класса, поступающего в сеть на обслуживание, которая определяет QoS-требования по скорости передачи пакетов.

Стоит отметить, что отбрасывание пакетов из очереди на каждом из интерфейсов узла может происходить не только ввиду ее фактического переполнения, реализуя схему Tail Drop, но и превентивно – в соответствии с механизмами активного управления очередями (Active Queue Management, AQM) [10].

При однопутевой маршрутизации управляющие переменные должны подчиняться условию

$$x_{(i,j)}^{h_k} \in \{0,1\}.$$

При реализации многопутевой стратегии маршрутизации с балансировкой нагрузки на управляющие переменные накладываются ограничения вида

$$0 \leq x_{(i,j)}^{h_k} \leq 1. \quad (5)$$

Для обеспечения управляемости процессом борьбы с перегрузкой каналов и очередей, т.е. для выполнения условия $\rho < 1$, в структуру модели вводятся следующие условия:

$$\sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle mp\delta \rangle} x_{(i,j)}^{h_k} (1 - p_{(i,j)}^{h_k}) < \varphi_{(i,j)}^h, \quad (i, j) \in E, \quad (6)$$

где $\varphi_{(i,j)}^h$ – пропускная способность j -го интерфейса i -го узла, выделенная для обслуживания пакетов потоков h -го класса. Эта переменная также является управляющей, т.к. она определяет порядок распределения пропускной способности КС между потоками пользователей. Исходя из физического смысла данных переменных, на них накладываются ограничения вида

$$0 \leq \varphi_{(i,j)}^h$$

и

$$\sum_{h \in H} \varphi_{(i,j)}^h \leq \varphi_{(i,j)}. \quad (7)$$

В качестве критерия оптимальности согласованного решения задач по управлению трафиком можно выбрать следующее условие:

$$\max_{x, \omega, \varepsilon} \left[\sum_{h \in H} a^h \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle mp\delta \rangle} (1 - \omega^{h_k}) \varepsilon^{h_k} \right], \quad (8)$$

в котором весовые коэффициенты a^h могут в общем случае отражать приоритет потоков трафика h -го класса. Выбор критерия (8) связан с условием максимизации общей производительности ТКС, т.к. представляет собой суммарную, взвешенную по приоритетам интенсивность потоков, обслуженных сетью. К рассмотрению также можно принять критерий

$$\min_{x, \omega, \varphi} \left[\left(\sum_{h \in H} a^h \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle mp\delta \rangle} \omega^{h_k} \right) + \left(\sum_{h \in H} \frac{1}{a^h} \varphi_{(i,j)}^h \right) + \left(\sum_{h \in H} \frac{1}{a^h} \sum_{k \in K} \lambda_{h_k}^{\langle mp\delta \rangle} x_{(i,j)}^{h_k} \right) \right], \quad (9)$$

который более полно учитывает затраты на отказы в обслуживании (первое слагаемое), а также на использование (второе слагаемое) и загруженность канальных ресурсов ТКС (третье слагаемое), а в целом нацелен на минимизацию использования доступных сетевых ресурсов.

II. Формализация условий обеспечения качества обслуживания по скоростным, временным показателям и показателям надежности

Для получения искомым условий обеспечения качества обслуживания по скоростным, временным показателям и показателям надежности при согласованном решении задач управления трафиком воспользуемся тензорным подходом к моделированию ТКС, подробно описанном в работах [8, 9]. В рамках тензорного описания ТКС на ее структуре вводится анизотропное (дискретное) пространство, образованное множеством контуров и узловых пар, размерность которого определяется общим количеством ветвей в сети и равна n [2, 3]. При этом, отдельно взятый независимый контур (узловая пара) трактуется в рамках рассматриваемого пространства-структуры как координатная ось, а их множество определяет систему координат.

Пусть одномерная сеть (симплекс) S связная, т.е. содержит один связный компонент, тогда цикломатическое число $\mu(S)$ и ранг $\phi(S)$ сети определяют в ней соответственно число базисных контуров и узловых пар, обуславливая справедливость следующих выражений:

$$\phi(S) = m - 1, \quad \mu(S) = n - m + 1, \quad n = \phi(S) + \mu(S), \quad (10)$$

где m – число узлов в ТКС.

В качестве функционального инварианта при тензорном описании ТКС [8, 9] будет выступать уравнение вида

$$\Lambda_v = G_v T_v, \quad (11)$$

где Λ_v и T_v – проекции тензоров Λ и T в системе координат ветвей сети, представленные в виде векторов соответственно интенсивностей потоков и средних задержек пакетов в ветвях сети размера n ; $G_v = \|g_v^{ij}\|$ – диагональная матрица размера $n \times n$, которая представляет собой проекцию метрического тензора G и зависит от выбранной дисциплины обслуживания пакетов на интерфейсе маршрутизатора.

Если интерфейс моделируется в виде системы массового обслуживания с отказами вида $M/M/1/N$, что имеет место при моделировании потоков SMTP/TCP [8, 9], средняя задержка пакетов в произвольном канале связи ТКС аппроксимируется выражением

$$\tau = \frac{\rho - \rho^{N+2} - (N+1)\rho^{N+1}(1-\rho)}{\lambda(1-\rho^{N+1})(1-\rho)}. \quad (12)$$

Для уточнения численных значений координат векторов и матриц, входящих в (11), выражение (12) запишем в форме

$$\tau_i^v = \frac{\rho_i^v - (\rho_i^v)^{N_i^v+2} - (N_i^v + 1)(\rho_i^v)^{N_i^v+1}(1 - \rho_i^v)}{(1 - (\rho_i^v)^{N_i^v+1})(1 - \rho_i^v)(\lambda_i^v)^2} \lambda_i^v, \quad i = \overline{1, n}, \quad (13)$$

где i – номер канала связи в ТКС, а индекс v указывает на то, что все параметры выражения (13) отнесены к ветвям сети. Тогда элементы главной диагонали матрицы $G_v = \|g_v^{ij}\|$ рассчитываются согласно выражению

$$g_v^{ii} = \frac{(1 - (\rho_i^v)^{N_i^v+1})(1 - \rho_i^v)(\lambda_i^v)^2}{\rho_i^v - (\rho_i^v)^{N_i^v+2} - (N_i^v + 1)(\rho_i^v)^{N_i^v+1}(1 - \rho_i^v)}, \quad \{v, i = \overline{1, n}\}. \quad (14)$$

Для описания информационных потоков IP, FTP, TCP, HTTP с целью учета их самоподобного характера должна быть использована более сложная, но в то же время позволяющая учесть долговременные зависимости система массового обслуживания $SS/M/1/N$, где символ SS указывает на самоподобие входного потока (от англ. self-similar) [8]. При использовании модели $SS/M/1/N$ для средней задержки пакетов τ_i^v в i -м канале используется выражение:

$$\tau_i^v = \frac{q_i + \frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H)}{f(H) \cdot \sum_{k \in K} \lambda_i^v} + \frac{1}{\varphi_i^v} = \frac{\frac{1}{\chi_i \varphi_i^v}}{1 - \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v+2}} \left\{ 1 - (N_i^v + 1) \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v} + N_i^v \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v+1} \right\} + \frac{1}{\varphi_i^v} \quad (15)$$

при

$$q_i = \frac{\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H)}{1 - \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v+2}} \cdot \frac{\left\{ 1 - (N_i^v + 1) \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v} + N_i^v \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v+1} \right\}}{1 - \frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H)} - \frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H), \quad (16)$$

где q_i – средняя длина очереди на i -м сетевом интерфейсе; $f(H)$ – функция, которая учитывает самоподобный характер поступающего в ТКС трафика; χ_i – вероятность отсутствия повторной передачи пакетов на i -м сетевом интерфейсе, которая возникает, например, когда пакет передается согласно протоколу TCP/RED (Transmission Control Protocol/Random Early Detection). При этом вероятность потерь пакетов, представленная выражением (3), для протокола TCP/RED определяется из выражения [1]:

$$p^{RED} = \frac{q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \frac{1}{\delta},$$

где Q_{\min} – минимальное пороговое значение среднего размера очереди; Q_{\max} – максимальное пороговое значение среднего размера очереди; δ – знаменатель граничной вероятности отбрасывания пакетов. Параметры Q_{\min} , Q_{\max} и δ , как правило, статически задаются при конфигурировании механизма раннего случайного обнаружения перегрузки RED.

Тогда элементы главной диагонали матрицы G_v будут рассчитываться как

$$g_v^{ii} = \lambda_v^i \left[\frac{\frac{1}{\chi_i \varphi_i^v}}{1 - \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v + 2}} \cdot \frac{\left\{ 1 - (N_i^v + 1) \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v} + N_i^v \left[\frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H) \right]^{N_i^v + 1} \right\}}{1 - \frac{\rho_i^v}{\chi_i} f(H)} + \frac{1}{\varphi_i^v} \right]^{-1}. \quad (17)$$

Выражение (11), справедливое для системы координат ветвей, в соответствии с постулатом второго обобщения Г. Крона [2] имеет такой же вид и в системе контуров и узловых пар:

$$\Lambda_{\pi\eta} = G_{\pi\eta} T_{\pi\eta}. \quad (18)$$

Ввиду того, что рассматриваемые системы координат ветвей, контуров и узловых пар сети введены для одного и того же n -мерного пространства, существуют однозначные правила преобразования координат тензоров Λ и T при переходе из одного базиса в другой. Основываясь на результатах ранее проведенных исследований [3-5, 8], проекции данных тензоров в разных системах координат связаны следующими зависимостями:

$$\Lambda_v = C \Lambda_{\pi\eta}, \quad (19)$$

$$T_v = A T_{\pi\eta}, \quad (20)$$

где $\Lambda_{\pi\eta}$ и $T_{\pi\eta}$ – представленные в виде векторов размера n проекция тензора Λ и T соответственно в системе координат контуров и узловых пар; C – $n \times n$ матрица контравариантного преобразования; A – $n \times n$ матрица ковариантного преобразования, связанная с матрицей C условием ортогональности

$$CA^t = I$$

при условии, что I – единичная матрица размера $n \times n$; $[\cdot]^t$ – операция транспонирования матрицы (вектора).

Ввиду того, что тензор G представляет собой дважды контравариантный метрический тензор, его проекция при смене координатной системы рассмотрения преобразуется следующим образом:

$$G_{\pi\eta} = A^t G_v A, \quad (21)$$

где $G_{\pi\eta}$ – проекция тензора G в системе координат контуров и узловых пар.

Тогда ранее полученные в работе [8] условия обеспечения качества обслуживания с учетом обновленной версии условий сохранения потока (1) принимают вид

$$\lambda^{\langle npb \rangle} (1 - p_{\langle don \rangle}) (1 - \omega) \leq G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} [G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle}]^{-1} \Lambda_{\eta-1} + \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} [G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle}]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle don \rangle}, \quad (22)$$

$$\sum_{i=2}^{\phi} \lambda_{\eta}^i \leq \lambda^{\langle npb \rangle} p_{\langle don \rangle}, \quad (23)$$

где $\lambda^{\langle npb \rangle}$ – требуемая интенсивность потока; $\tau_{\langle don \rangle}$ – допустимая межконцевая средняя задержка; $p_{\langle don \rangle}$ – допустимая вероятность потерь пакетов $p_{\langle don \rangle}$;

$$\sum_{i=2}^{\phi} \lambda_{\eta}^i = \sum_{i=2}^{\phi} \sum_{j=1}^{R_i} \lambda^{\langle npb \rangle} x_{(i,j)} p_{(i,j)}$$

– суммарная интенсивность потерь пакетов рассматриваемого потока на всех интерфейсах всех маршрутизаторов ТКС; R_i – число выходных интерфейсов на i -м маршрутизаторе;

$$\left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \\ \hline \text{---} & \text{---} \\ G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \end{array} \right\| = G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}, \quad \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle} \\ \hline \text{---} & \text{---} \\ G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} \end{array} \right\| = G_{\pi\eta},$$

причем $G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}$ – первый элемент матрицы $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$; $G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle}$, $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$ – квадратные подматрицы размера $\mu \times \mu$ и $\phi \times \phi$ соответственно; $G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle}$ – подматрица размера $\mu \times \phi$; $G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle}$ – подматрица размера $\phi \times \mu$.

Преимуществом условий (22) является то, что они справедливы при совместной реализации многопутевой стратегии маршрутизации, динамическом профилировании трафика и распределении пропускной способности каналов связи между потоками различных классов обслуживания. Условия (22) и (23) выступают в качестве дополнительных нелинейных по своему содержанию ограничений при формулировке оптимизационной задачи по управлению трафиком в ТКС, например, с критерием (8) или (9).

III. Исследование предложенной модели управления трафиком

С помощью предложенной модели управления трафиком (1)-(23) проведено исследование эффективности согласованного решения задач многопутевой маршрутизации и профилирования трафика в условиях перегрузки, т.е. при наличии потерь

пакетов на узлах ТКС, обусловленных перегрузкой буфера очереди. На рис. 2 показаны результаты решения данных задач при следующих требованиях: $\lambda^{(трб)} = 170$ 1/с, $\tau_{(дон)} = 92$ мс и $p_{(дон)} = 3 \cdot 10^{-2}$, емкость буфера на каждом из интерфейсов маршрутизаторов сети составляет 19 пакетов ($N = 20$). В разрывах каналов связи указаны (сверху вниз): пропускная способность (1/с), интенсивность потока (1/с) и средняя задержка пакетов (мс).

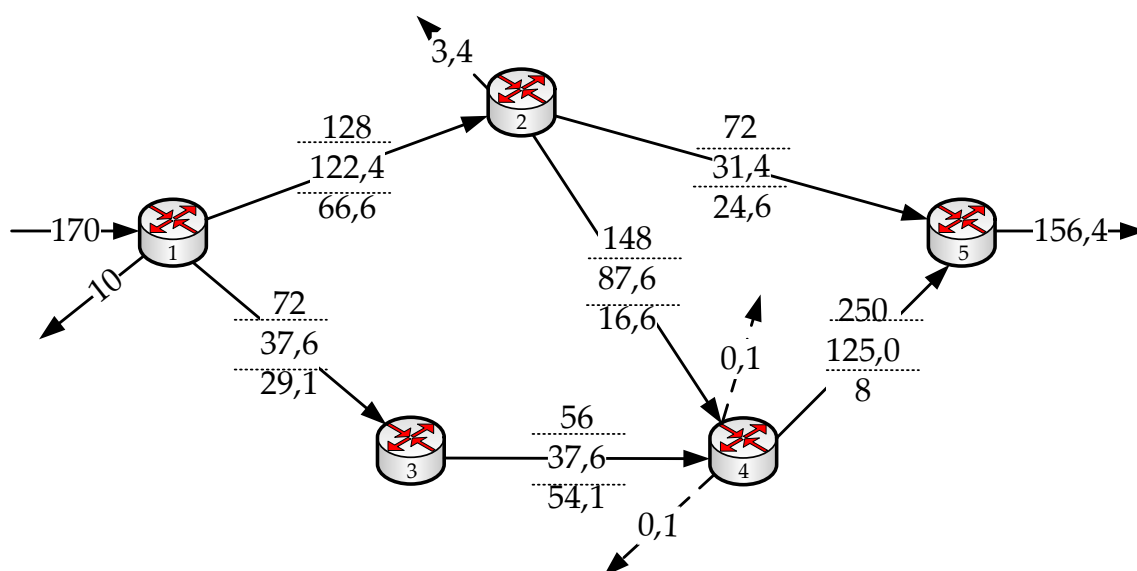


Рис. 2. Пример сети и результирующий порядок маршрутизации потоков и профилирования трафика в ней

В результате решения поток на границе сети испытал ограничение интенсивности на 10 пакетов в секунду (1/с), средняя задержка пакетов вдоль всех возможных маршрутов между первым и пятым маршрутизаторами была одинаковой и составляла 91,2 мс, а вероятность потерь пакетов – $p_{(дон)} = 2,25 \cdot 10^{-2}$, что соответствовало выдвигаемым QoS-требованиям.

Для демонстрации преимуществ предложенного решения производилось его сравнение с ранее известными подходами. Сравнению подлежали три вида решений, получаемых с помощью трех различных математических моделей. Первая модель (модель M1) ориентирована на выполнение требований концепции Traffic Engineering посредством сбалансированного использования канальных ресурсов [11]. В качестве критерия оптимальности решения выступал минимум максимального коэффициента использования каналов связи ТКС:

$$\min \max_i \rho_i.$$

Модель M2 также была нацелена на сбалансированное использование сетевых ресурсов, однако в отличие от модели M1, реализует это путем равномерного использования буферных ресурсов. Здесь в качестве критерия оптимальности выступал минимум максимальной по всем сетевым интерфейсам длины очереди

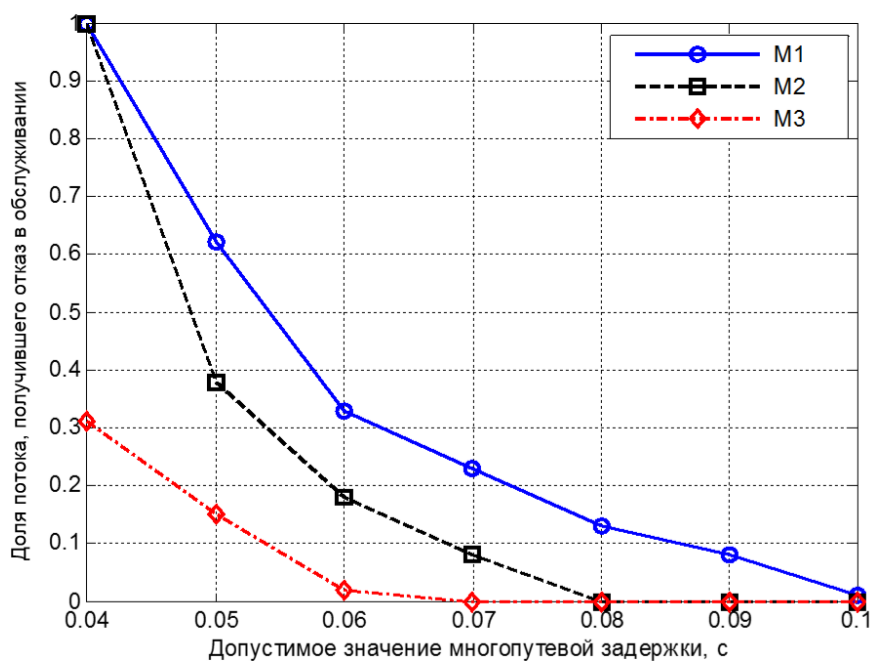
$$\min_i \max \{q_i\},$$

где расчетные выражения для оценки средней длины очереди на i -м сетевом интерфейсе q_i должны быть согласованы с правилами формирования матрицы проекции метрического тензора $G_v = \|g_v^{ij}\|$. Например, в случае представления i -го сетевого интерфейса системой массового обслуживания $SS/M/1/N$ для расчета величины q_i будет использовано выражение (16), а в случае использования модели $M/M/1/N$ –

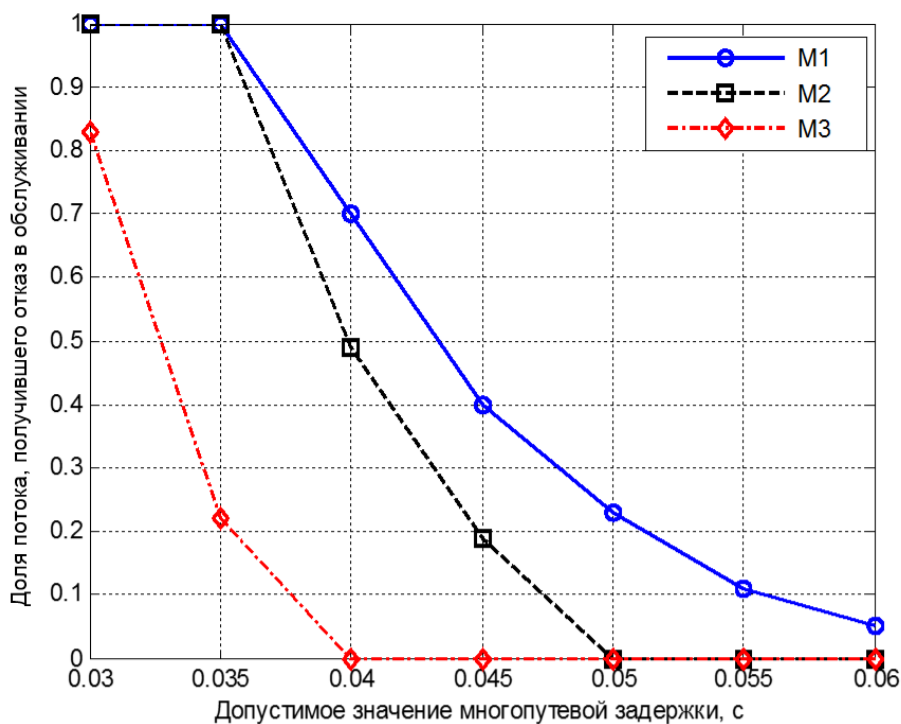
$$q_i = \frac{\rho_i^v}{1 - \rho_i^v} - \frac{(N_i^v + 1)\rho_i^{v(N_i^v + 1)}}{1 - \rho_i^{v(N_i^v + 1)}}.$$

Третья модель была представлена выражениями (1)-(23).

Расчету подлежала доля потока, получившего отказ в обслуживании ω при использовании моделей M1-M3 для сети, представленной на рис. 2, в зависимости от допустимого значения средней многопутевой задержки $\tau_{\langle don \rangle}$ при фиксированных значениях интенсивности поступающего в сеть потока и вероятности потерь пакетов, например при $\lambda^{\langle trb \rangle} = 130$ 1/с и $p_{\langle don \rangle} = 1 \cdot 10^{-3}$. В ходе анализа результатов маршрутных решений (рис. 3) установлено, что модель M3 за счет выполнения ограничений (22), (23) позволяет уменьшить долю потока, получившего отказ в обслуживании, по сравнению с моделями M1 и M2 при одних и тех же допустимых величинах средней задержки и вероятности потерь пакетов. Так, в случае использования модели $M/M/1/N$ (рис. 3 а) удалось уменьшить отказы в обслуживании на границе сети в среднем на 60-75 % (например, при $\tau_{\langle don \rangle} \leq 0,05$ с), а при использовании модели $SS/M/1/N$ (рис. 3 б) – до 80 % (например, при $\tau_{\langle don \rangle} \leq 0,04$ с). С другой стороны, использование модели M3 позволяет на 15-35 % уменьшить допустимое значение многопутевой задержки пакетов без ограничения интенсивности входного потока.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость доли потока, получившего отказ в обслуживании, от допустимого значения межконцевой многопутевой задержки при интенсивности поступающего в сеть потока $\lambda^{trb} = 130$ 1/с и вероятности потерь пакетов $p_{don} = 1 \cdot 10^{-3}$ в условиях использования моделей $M/M/1/N$ (а) или $SS/M/1/N$ (б)

Выводы

В статье предложена потоковая модель управления трафиком в ТКС, в рамках которой обеспечивается согласованное решение следующих сетевых задач:

- многопутевая маршрутизация;
- профилирование трафика;
- динамическое распределение пропускной способности каналов связи между потоками пользователей.

В рамках полученных решений обеспечиваются требуемые значения таких ключевых показателей качества обслуживания как скорость передачи пакетов, средняя задержка и вероятность потерь пакетов. Подобный характер решений удалось реализовать, благодаря использованию обновленной версии условий сохранения потока на маршрутизаторах ТКС и в сети в целом (1), что позволило расширить круг решаемых задач на процессы профилирования трафика. Это повлекло, в конечном итоге, также модификацию и условий обеспечения качества обслуживания (22), которые были получены с использованием аппарата тензорного анализа сетей. Полученные результаты адаптированы под обслуживание потоков SMTP/TCP, когда использовалась СМО $M/M/1/N$, и потоков IP, FTP, TCP, HTTP, что было связано с применением СМО типа $SS/M/1/N$. Работоспособность предложенного подхода показана на численном примере (рис. 2).

В целом использование предложенных в статье решений, как показали результаты исследований (рис. 3), позволило снизить отказы в обслуживании в среднем от 60-75 % до 80 %, а также на 15-35 % уменьшить допустимое значение многопутевой задержки пакетов без ограничения интенсивности входного потока.

С точки зрения практической реализации разработанной модели стоит отметить, что наибольшая эффективность ее применения обеспечивается в условиях мультипотокового трафика различных классов обслуживания с дифференцированными QoS-требованиями по множеству показателей: скорости передачи, средней задержке и вероятности потерь пакетов.

Список литературы:

1. Вегешна III. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
2. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Сов. радио, 1978. – 719 с.
3. Лемешко А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной // Праці УНДІРТ. Випуск №4 (40). – Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. – С. 12-18.
4. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базисе межполюсных путей и внутренних разрезом // Наукові записки УНДІЗ. – 2010. – Вип. 1(13). – С. 14-26.

5. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В. Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 38–54.
6. Дробот О.А. Комплексная модель обеспечения гарантированного качества обслуживания с реализацией динамических стратегий распределения сетевых ресурсов // Радиотехника: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. – 2007. – № 148. – С.54-64.
7. Саваневич В.Е., Лемешко О.В., Агеев Д.В., Добришкін Ю.М. Комплексна модель маршрутизації та обмеження трафіку в телекомунікаційних мережах військового призначення // Системи озброєння та військова техніка. – 2010. – № 2 (22). – С. 78 – 84.
8. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 4 (9). – С. 16 - 31. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_lemeshko_tensor.pdf.
9. Lemeshko A.V., Evseeva O.Yu., Garkusha S.V. Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service Quality by Greate Number of Indices // Telecommunications and RadioEngineering. – Vol.73, No 15. – P. 1339-1360.
10. Lemeshko O.V., Yevsyeyeva O., Garkusha S. Reliability tensor model of telecommunication network with RED // Radioelectronics & Informatics. – 2012. – №4(59). – P. 40-44.
11. Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya. Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks // Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale. – 2001. – Vol.2., №1. – P. 348-353.